

**TURMALINPETROGRAPHIE PERMISCHER PEGMATITTE
AUS DER MATSCHER DECKE (VINSCHGAU, SÜDTIROL)**

von

Peter Tropper & Solveig Hopf

Institut für Mineralogie und Petrographie
Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck, Österreich

Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Turmaline in permischen Pegmatiten aus der Matscher Decke untersucht. Es wurden dabei zwei Wachstumsstadien festgestellt: 1.) ein Permische Wachstum der Paragenese K-Feldspat + Plagioklas + Muskovit + Granat + Quarz + Turmalin + Baddeleyit/Zirkon und 2.) ein eoalpines Wachstum von Turmalin + Muskovit + Apatit. Metamorpher Turmalin wächst hier entweder am äußersten Rand (Tur met-1) oder texturell etwas später entlang von Rissen (Tur met-2). Die chemische Zusammensetzung der permischen Turmaline verändert sich entlang der Substitution $Al_{(tot)} + Li + \square \leftrightarrow Na[X] + (= Fe^{2+}, Mn^{2+}, Mg^{2+})[Y]$ und weist einen Übergang von Foitit zu Schörl vom Kern zum Rand hin auf. Die eoalpinen Turmaline zeigen eine Zusammensetzung, welche als Schörl bis F-Schörl klassifiziert werden und sie zeichnen sich durch hohe Si-, Mg-, F- und Na-Gehalte aus. Die ältere metamorphe Turmalinergeneration (Tur met-1) zeichnet sich durch höhere Al[Y] und Ca[X] Gehalte im Vergleich zu den Rissfüllungen (Tur met-2) aus. Die Rissfüllungen haben aber höhere F[W] Gehalte. Eoalpidisch kam es daher zu einer späteren, tieftemperierteren Mobilisation von F, Ca und P die auch mit einer Kristallisation von Apatit entlang von Rissen im Turmalin einhergeht.

Abstract

The petrographic investigation of tourmalines in pegmatites from the Matsch Unit yields two main stages of tourmaline growth namely 1.) a Permian growth stage with the mineral assemblage K-feldspar + plagioclase + muscovite + garnet + quartz + tourmaline + baddeleyite/zircon and 2.) an Eo-Alpine growth stage of tourmaline + muscovite + apatite, where an older generation of tourmaline grows at the outermost margins (Tur met-1) and a younger tourmaline generation (Tur met-2) which grows along veins. The chemical composition of Permian tourmaline varies along the vector $Al_{(tot)} + Li + \square \leftrightarrow Na[X] + (= Fe^{2+}, Mn^{2+}, Mg^{2+})[Y]$ and they can be classified as Foitites to Schörl from core to rim. The older Eo-Alpine tourmaline generation (Tur met-1) shows higher Al[Y] and Ca[X] contents compared to the vein fillings (Tur met-2) and both yielded compositions ranging from Schörl to F-Schörl. Tur met-2 shows clearly elevated F[W] contents. As part of the later lower-T stages of Eo-Alpine metamorphism F, Ca and P were mobilized and formed apatite within fractures in tourmaline.

Einleitung

Die Matscher Decke ist eine austroalpine tektonische Einheit, die im Vinschgau (S-Tirol) zwischen dem Matscher Tal im Westen und dem Schnalstal im Osten auftritt. Ein Charakteristikum dieser Decke ist das Auftreten von permischen Pegmatiten. Durch petrographische und mineralchemische Untersuchungen der Pegmatite wird versucht die polymetamorphe Geschichte dieser Gesteine zu ermitteln. Altersdatierungen ergaben für das Intrusionsereignis ein permisches Alter (HABLER et al., 2009). Spätere kreidezeitliche, bzw. eoalpidische metamorphe Überprägung und Deformation führte zur Ausprägung örtlich unterschiedlich starker Deformation in den Pegmatitgängen. Diese Arbeit befasst sich mit der Petrographie von Turmalinen, welche häufig als maximal 1-2 cm große schwarze Kristalle in den Pegmatiten der Matscher Decke auftreten.

Turmalin ist über einen weiten P-T Bereich stabil und reagiert sehr sensibel auf chemische Änderungen in koexistierenden Mineralen, auf hydrothermale Aktivitäten und die Einbringung von gelösten Stoffen, als auch auf die herrschenden P-T Bedingungen, während des Wachstums (HENRY & DUTROW, 1996; VAN HINSBURG et al., 2011). Diese komplexen chemischen Eigenschaften machen Turmalin zu einem Mineral, welches sich ideal zur Rekonstruktion metamorpher Bedingungen anbietet und welches als Anzeiger von Fluidaktivitäten dienen kann. Aus diesem Grund wurde ein besonderes Augenmerk auf die Beziehung zwischen Wachstumsereignissen und chemische Zonierung in Turmalinkristallen gelegt.

Geologischer Rahmen

Die Matscher Decke (MD) bildet eine eigenständige Einheit auf dem südlichen Teil des kristallinen Basements des Ötztalkristallins (ÖC) und befindet sich westlich des Tauernfensters und des Schneeberger Zuges. Der größte Teil der MD besteht aus drei metapelitischen Hauptgesteinstypen (HAMMER, 1912): Biotit-Plagioklas-Gneise (\pm Sillimanit, Granat, Staurolith, Kyanit, Andalusit), Granat-Staurolith-Zweiglimmergneise (\pm Andalusit, Sillimanit, Kyanit) und Granat-Muskovit-Schiefer (\pm Staurolith, Chloritoid). Die metapelitischen Gesteine wurden durch die variszische Regionalmetamorphose zuerst amphibolitfaziell, später durch eine permische Nieder-P/Hoch-T Metamorphose, verbunden mit der Intrusion von Pegmatiten, überprägt (HABLER et al., 2009). Weiters wurden sie während der eoalpidischen Metamorphose grünschieferfaziell überprägt. Lithologisch weist die MD Ähnlichkeiten mit dem Ortler-Campo-Komplex (OCK) auf, welcher südlich der Vinschgauer Scherzone liegt. Die, vor allem in den Bt-Pl-Gneisen und den Grt-St-Zweiglimmergneisen auftretenden Pegmatite, stellen ebenfalls eine analoge Lithologie zu den Gängen des Marteller Granits des OCK dar. Das Intrusionsereignis der Pegmatite wurde durch die Anwendung von Granat Sm-Nd-Geochronologie auf ein Permische Alter datiert (280-263 Ma) und die Rb-Sr Datierung ein Alter von 271 ± 3 Ma (HABLER et al., 2009). Tektonisch betrachtet nimmt die MD gegenüber dem ÖC, getrennt durch die Vinschgauer Scherzone (VSZ) eine Hangendposition ein (SCHMID & HAAS, 1989). Die Aktivierung der Vinschgauer Scherzone verursachte zwei Hauptbewegungsphasen. Die erste Bewegung fand als eine west-gerichtete Überschiebung zwischen 95-80 Ma statt, schließlich folgte eine südost-gerichtete Dehnungsphase, welche sich als Fortsetzung der VSZ in der Schliniglinie ausprägte (SCHMID & HAAS, 1989).

HABLER et al. (2009) beschreiben mithilfe von Phasenbeziehungen die drei Wachstums- bzw. Metamorphosephasen, welche in der MD durchlaufen wurden.

Die variszische Metamorphose ist durch die Mineralparagenese Granat + Staurolith + Biotit + Muskovit + Plagioklas ± Kyanit ± Sillimanit repräsentiert. Staurolith + Kyanit + Plagioklas bildeten sich auch postdeformativ, wobei Staurolith später durch Andalusit ersetzt wurde. Die permische Wachstumsphase wird mit der Pegmatitintrusion assoziiert und führte zur Bildung der Paragenese Andalusit + Granat ± Staurolith ± Sillimanit + Biotit + Plagioklas durch die begleitende Kontaktmetamorphose. Die Überschiebung der MD auf das ÖC fand wahrscheinlich vor der Oberkreide statt, da beide die gleiche Deformation und eo-alpine Metamorphosezonierung aufweisen. Die letzte kreidezeitliche Metamorphose führte anschliessend zur Bildung der Paragenese Chloritoid + Paragonit + Albit + Muskovit unter grünschieferfaziellen P-T Bedingungen von 4-6 kbar und $480 \pm 26^\circ\text{C}$ (HABLER et al., 2009)

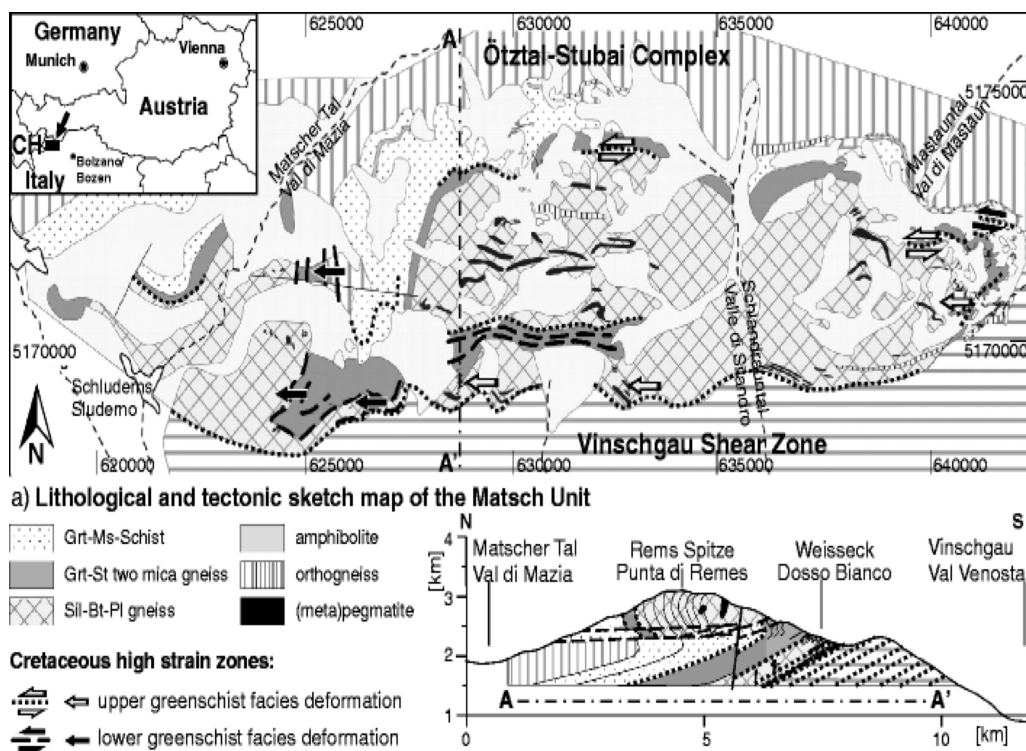


Abbildung 1:

Lithologische und tektonische Gliederung der Matscher Decke aus HABLER et al. (2009).

Arbeitsmethoden

Die wellenlängendispersiven Messungen an der Elektronenstrahlmikrosonde wurden an einer JEOL 8100 SUPERPROBE bei einer Beschleunigungsspannung von 15 kV und einem Probenstrom von 10 nA durchgeführt. Für die Standardisierung wurden folgende Standards verwendet: Quarz (Si), Fluor-Topas (F), Diopsid (Ca, Mg), Orthoklas (K), Atacamit (Cl), Jadeit (Na), Korund (Al), Chromit (Cr), Rutil (Ti), Almandin (Fe) und Rhodonit (Mn). Die Berechnung der Turmalinformeln und die Klassifikation der Turmaline wurde mit dem Programm WinCLASTOUR (Yavuz et al. 2006) durchgeführt. Dieses Programm errechnet hypothetische B, Li und H₂O Gehalte aufgrund der Annahme, dass die Z-Position mit Al (6 apfu) und die B-Position mit Bor (3 apfu) vollständig gefüllt ist.

Lithologische Beschreibung der Pegmatitgänge der Matscher Decke

Die Pegmatite der MD zeichnen sich durch die Mineralparagenese Plagioklas + K-Feldspat + Quarz + Turmalin + Granat aus und schneiden das metapelitische Umgebungsgestein diskordant zur Hauptfoliation. In weiten Bereichen der MD sind die Deformationserscheinungen in den Pegmatiten durch ihre Grobkörnigkeit weniger stark ausgeprägt als in den Metapeliten. Die letzte metamorphe Überprägung der Pegmatitgänge fand in Zusammenhang mit der eoalpidischen Orogenese bei grünschieferfazieller Metamorphose statt (HABLER et al., 2009). Die Proben für diese Untersuchung im Zuge einer Bachelorarbeit wurden in einem Gebiet zwischen der Bergler Spitze im NW und der Zerminger Spitze im SE im NE des Schlandrauntales oberhalb von Schlanders genommen (HOPF, 2010). Die Pegmatitproben zeichnen sich durch einen hohen Hellglimmeranteil, sowie bis zu mehrere Zentimeter große isometrische schwarze Turmaline aus. Mit bloßem Auge erkennbar ist der Mineralbestand: K-Feldspat + Muskovit + Quarz + Turmalin. Grobkörnige Turmalinporphyroklasten und blättriger Muskovit verleihen dem Ganggestein eine porphyrische Textur. Untergeordnet treten Proben mit einem magmatischen Fließgefüge aus, in dem sich helle Lagen von Quarz und Feldspat mit Lagen aus mittelkörnigem, idiomorphen Turmalin abwechseln.

Petrographie

Polarisationsmikroskopie: Die Proben wurden anschliessend unter dem Durchlichtmikroskop auf besondere Gefügemerkmale untersucht. Die Farbe der Turmaline reicht von einer gelben Eigenfarbe bis zu eher bläulich-grünen Turmalinen. In allen Proben wurden kataklastisch zerbrochene, Turmaline und reliktsche Granate, gefunden. Auffallend sind außerdem mehrere Generationen von Quarzkörnern, welche sich durch unterschiedliche Rekristallisationsgefüge wie Subkornbildungen, Bulging, undulöse Auslöschung und Bildung von Triple Junctions auszeichnen.

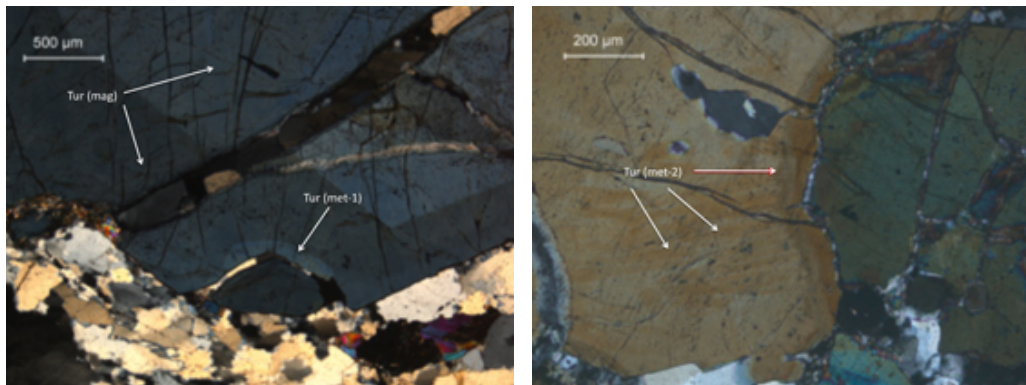


Abbildung 2:

Dünnschliffotos von magmatischen (Tur mag) und metamorphen Zonierungen (Tur met-1, Tur met-2) in Turmalinen. Die grobe, magmatische Zonierung erfasst den ganzen Kristall (linkes Bild, Probe 1A) während die metamorphe Zonierung am Rand (Tur met-1) oder entlang von Rissen (Tur met-2) auftritt (rechtes Bild, Probe 4A, beide Bilder mit x Nicols aufgenommen).

Abbildung 3:

Lagenartiges Auftreten von idiomorphen, optisch zonierten Turmalinen mit gelber Eigenfarbe (Probe 4C, II Nicols).



Probe 1A: Die Probe 1A weist nur wenige, regelmässig zonierte Turmalinkristalle auf (Abb. 2), enthält aber im Gegensatz auffallend große und relativ viele Hellglimmer und grobkörnigen Plagioklas. Bei den Hellglimmern wurde teilweise eine Zonierung beobachtet. In Plagioklas wurden außerdem relikttisch sehr kleine Granat-Einschlüsse beobachtet. Als Füllung in Rissen in Plagioklas tritt hier Chlorit auf. An manchen grobkörnigen Hellglimmern kam es zur Drucklösung bei der Verformung. Außerdem ist eine starke Foliation im Quarz-Gefüge erkennbar.

Probe 1B: Die Probe zeichnet sich durch den Mineralbestand Quarz + Feldspat + Muskovit + Turmalin aus. Sie weist ein überwiegend magmatisches Gefüge mit wenigen zerbrochenen Turmalinen, dafür aber stark zonierten Randbereichen auf. Primärer, magmatischer Turmalin ist häufig mit Muskovit + Granat + Biotit assoziiert. Er weist häufig eine schwache Zonierung auf und ist blau-grün bis khakifarben im Dünnschliff. Die Grundmasse wird in dieser Probe von Quarz gebildet. Dieser führt zu einer gleichkörnig, granoblastischen Struktur, wobei die einzelnen Quarzkörner ein buchtig verzahntes metamorphes Gefüge aufweisen. Es kam auch zur Ausfällung von Quarz innerhalb von Rissen im Turmalin gekommen was auf eine spätere Fluizirkulation schliessen lässt. Hinweise auf präkinematisches Kristallwachstum liefern in dieser Probe stark undulös auslöschende Quarzörner und geknickter Biotit.

Probe 2: Die Mineralparagenese dieser Probe unterscheidet sich im Wesentlichen nicht von den anderen Proben sie enthält aber kein Granat. Die Plagioklaskörner besitzen hier oft polysynthetische Zwillinge. Am Rand der Turmalinkristalle treten mehrere Generationen von Quarzkörnern auf wobei eine davon sehr feinkörnig in den Zwischenräumen größerer Quarzkörner vorliegt.

Probe 3 besitzt ein typisches Deformationsgefüge bestehend aus sehr feinkörnigem Plagioklas + Quarz und nur sehr kleinen Turmalinen. Granat tritt als sehr stark kataklastisches Relikt auf und ist zum größten Teil durch andere Minerale ersetzt wie z.B. durch sehr kleine Hellglimmerplättchen. Neben den feinkörnigen Hellglimmern treten auch große geknickte Hellglimmer auf welche bei parallelen Nicols einen gelblich-braunen Saum zeigen. Diese Hellglimmer haben den Kristallverband bereits vor der Deformation überwachsen und wurden im Verlauf der letzten Verformungsphase geknickt.

Probe 4A: Das Gefüge der Probe zeichnet sich durch große Turmalinkristalle mit grünlich-gelber Eigenfarbe aus, welche stark ausgeprägte Anwachssäume zeigen. Auch innerhalb der Turmalinkristalle treten Bereiche mit variierender optischer und chemischer Zusammensetzung auf, welche sich durch ihre unterschiedliche Farbintensität voneinander abheben.

Es lassen sich vor allem in den Randbereichen verfüllte Risse im Turmalin ausmachen (Abb. 2). Die durch spröde Verformung entstandenen Brüche und Risse bilden quarz-gefüllte Gänge in den kataklastischen Turmalinen. Neben Quarz + Feldspat + Muskovit + Turmalin tritt als Akzessorium auch noch Zirkon auf.

Probe 4B: Die Ausrichtung der großen Hellglimmer lässt den Schluss zu, dass in dieser Probe ein magmatisches Fließgefüge dominiert. Schon im Handstück kann man einen Lagenbau erkennen. Durch spätere Deformationsprozesse wurden die Glimmer verformt. Direkt an die Hellglimmerlage grenzt ein großer stark zerbrochener Turmalin, welcher eine Generation von kleineren zonierten Turmalinen aufweist.

Probe 4C: Die Turmaline der Probe 4C unterscheiden sich im Dünnschliff von den anderen Proben durch ihre gelbliche Eigenfärbung (Abb. 3). Die Probe weist ein lagiges Gefüge auf das wahrscheinlich noch magmatischen Ursprungs ist. Sie wurde höchstwahrscheinlich einem Bereich im Pegmatit entnommen in dem die schwereren Turmalinkristalle schollenartig auftreten und fraktioniert vom Rest der Schmelze kristallisierten.

BSE Petrographie: Mittels rückgestreuten Elektronenbildern (BSE: backscattered electron images) konnten die Zonierungen als auch wichtige Mineralparagenesen im Kleinbereich detailliert aufgenommen werden. Optisch konnte festgestellt werden, dass großräumige eher schwache magmatische Zonierungen (Abb. 2) auftreten. Die feinen Zonierungen, welche sich am Rand oder im Bereich von Rissen befinden sind später metamorph entstandene Zonierungen (Abb. 2). Dies konnte durch BSE Bilder verifiziert werden (Abb. 4). In der Probe 1B wurden sowohl magmatische (Abb. 4), als auch einfache und komplexe metamorphe Zonierungen (Tur met-1) beobachtet (Abb. 4, 5). In Abbildung 5 sind Risse erkennbar, die mit metamorph gewachsenem Turmalin (Tur met-2) gefüllt sind. Turmalin wächst auch in offenen Rissen (Abb. 6).

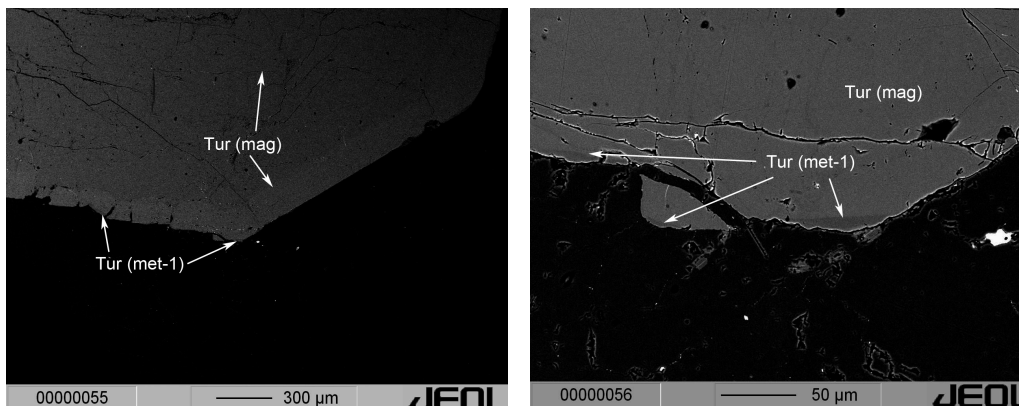


Abbildung 4:

BSE-Bilder von unterschiedlichen Zonierungen. Links: magmatische Zonierung; rechts: einfache metamorphe Zonierung (Probe 1B). Tur (mag) weist auf magmatischen Turmalin hin. Tur (met-1) ist der ältere metamorph gewachsener Turmalin, der als dünner Anwachssaum auftritt. Tur (met-2) ist der jüngere metamorph gewachsener Turmalin, der in Rissen auftritt.

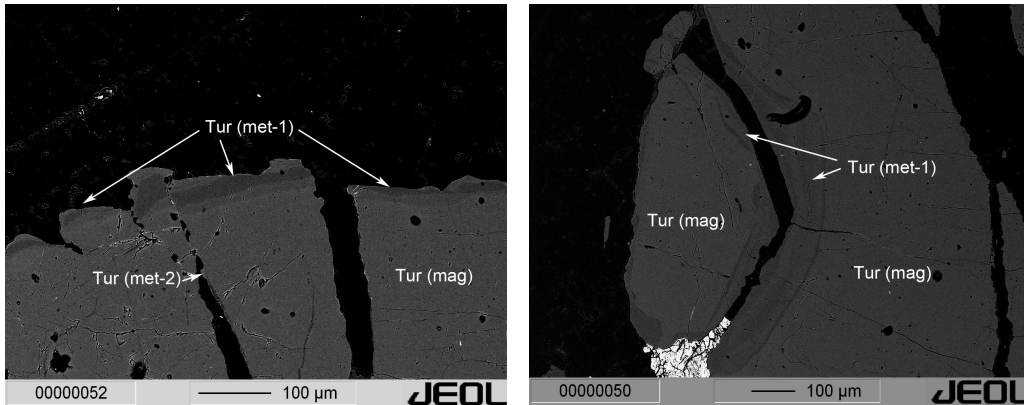


Abbildung 5:
BSE-Bild von komplexen metamorphen Zonierungen in den äussersten Randbereichen (links) oder entlang von Rissen (rechts) (Probe 1B).

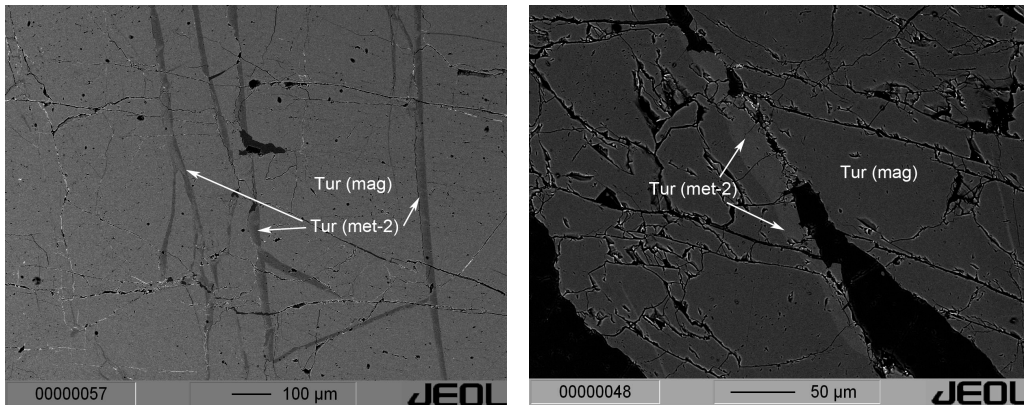
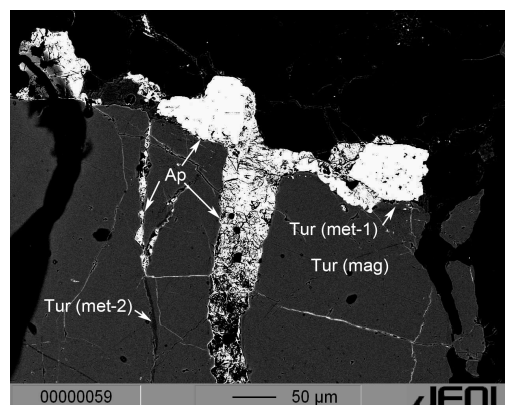


Abbildung 6:
BSE-Bilder von metamorphem Turmalinwachstum (Tur met-2) entlang von verfüllten Rissen (linkes Bild) oder offenen Rissen (rechtes Bild, Probe 1B).

In Probe 1B ist auffällig, dass am Rand von Turmalin häufig Zirkon und Apatit an Rissen auftreten (Abb. 7). Apatit zeigt Rissfüllungen von Pyrit (Abb. 8). Des Weiteren wurde in Probe 1B die Umwandlung von magmatischem Baddeleyit in Zirkon und UO_2 nach folgender Reaktion: $ZrO_2 + SiO_2 = ZrSiO_4$ beobachtet (Abb. 9).

Abbildung 7:
BSE-Bild von Apatit-Aggregat am Rand von kataklastischem Turmalin (Probe 1B).



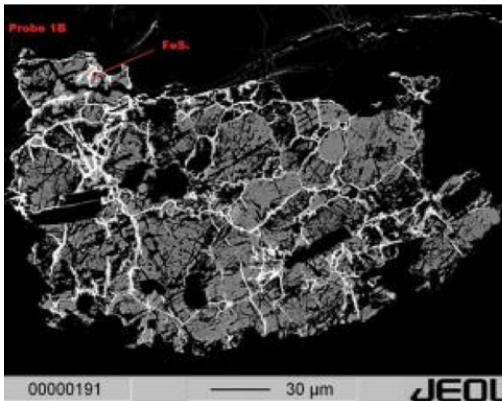


Abbildung 8:
BSE-Bild von mit Pyrit gefüllten Adern im Apatit (Probe 1B).

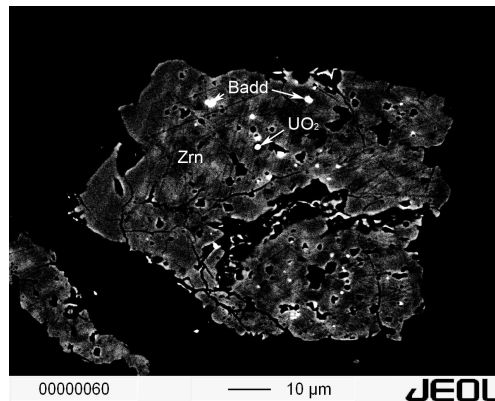
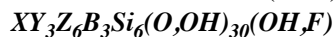


Abbildung 9:
BSE-Bild von Zirkon mit Baddeleyit- und Uraniumoxidrelikten (Probe 1B).

Mineralchemie der untersuchten Turmaline

Turmalin besitzt eine rhomboedrische Symmetrie und kristallisiert in der Raumgruppe R3m. Die allgemeine Formel ist nach HAWTHORNE & HENRY (1999):



Die Y-Stellen werden oktaedrisch von den Sauerstoff und OH-Ionen umgeben $[YO_4(OH)_2]$. Jeder Oktaeder teilt dabei zwei seiner Ecken mit dem nächsten Nachbarn, wobei sie um die zentrale 3-Drehachse angeordnet sind. Sie bilden das zentrale trigonale Element einer Brucit-Schicht $(Mg(OH)_2)$. Die Z-Stellen sind von 6 Sauerstoffatomen koordiniert $[ZO_5OH]$ und bilden verzerrte Oktaeder, welche mit den zentralen größeren Y-Stellen Oktaedern kantenverknüpft sind. Zwischen den größeren und kleineren kantenverknüpften Oktaedern liegen die B-Ionen in ebenfalls tetraedrischer Koordination vor und sind mit ihnen über Ecken verknüpft. Eckenverknüpfte O-Atome bilden um Si-Atome 6 Tetraeder, welche durch Teilen je zwei ihrer Ecken einen Sechsering bilden $[Si_6O_{18}]$. Die Al, B und Na Ionen dienen auf verschiedenem Weg dazu, den zentralen Kern $[Y_3(OH)_4Si_6O_{21}]$ zusammenzuhalten. Die X-Stelle besitzt eine Verbindung zu drei Sauerstoffatomen und einem Hydroxyl-Ion in tetraedrischer Koordination. Nur eine von vier möglichen (OH)-Positionen kann von F besetzt werden, was in der Formel folgendermaßen gegeben ist: $O_{30}(OH,F)$. Die Struktur von Turmalin führt zur Bildung einer Scheinrundung im Schnitt senkrecht zur c-Achse (OKRUSCH & MATTHES, 2009). Für die Berechnungen mittels dem Programm WinCLASTOUR (YAVUZ et al., 2006) wird die generelle Formel für Turmalin $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$ (HAWTHORNE & HENRY, 1999) verwendet wobei die Gitterpositionen wie folgt besetzt werden:

- X = Ca, Na, K, □ (Leerstelle)
- Y = Li, Mg, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al, Cr^{3+} , V^{3+} , Fe^{3+} , (Ti^{4+})
- Z = Mg, Al, Fe^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+}
- T = Si, Al, (B)
- B = B, (□)
- V = OH, O (=O3)
- W = OH, F, O (=O1)

Für die vollständige Erstellung der Strukturformel einer Turmalinprobe können auch mehrere Normalisierungsverfahren angewendet werden um die Elementgehalte einer Einheitszelle zu berechnen. Mögliche Normalisierungen können auf der Basis von 32, 24.5, 29 Sauerstoffatomen, 19 oder 18 Kationen, 15 Kationen (ohne [□] und Bor), 6 Siliziumatomen, bzw. anhand von $X + Y + Z + T = 16$ Kationen oder $Y + Z + T = 15$ Kationen (wenn $[X] = \square$) erfolgen (CLARK, 2007). Das Programm WinCLASTOUR arbeitet mit der Normalisierung auf der Basis von 31 Sauerstoffatomen ($O + F + OH$) und errechnet daraus die stöchiometrischen Gehalte an B_2O_3 ($B = 3$ apfu), H_2O und Li_2O .

Alle Mikrosondenanalysen ergaben Gesamtsummen von 83 bis 85 Gew.%. Die Berechnung mit dem Turmalinformatprogramm WinCLASTOUR (YAVUZ et al., 2006) ergab hypothetische B, Li und H_2O Gehalte von 10.5, 0.2-0.3 und 3.4-3.5 Gew.%. Texturell und mineralchemisch konnten drei Gruppen von Turmalinanalysen unterschieden werden: 1.) magmatischer Turmalin (Tur-mag), der den Grossteil des Korns ausmacht; 2.) metamorpher Turmalin-1 (Tur met-1), der dünne, einfache oder komplexe Säume am Rand der magmatischen Turmaline bildet und 3.) metamorpher Turmalin-2 (Tur met-2), der entlang von Rissen in den Turmalinporphyroblasten wächst. Die Unterschiede in den Mg, Na, F und Si Gehalten zwischen diesen drei Gruppen sind in Abbildungen 10A-C dargestellt. Generell ist in Probe 1B ein Trend zu beobachten, dass der F-Gehalt in den Anwachssäumen höher ausfällt als in der Matrix, bzw. dem Inneren der Turmalinkristalle. In den magmatischen Zonierungen ist der Al-Gehalt relativ hoch, der Na Gehalt fällt gering aus. Bei Änderung der Schmelzzusammensetzung während der Weiterkristallisation bildeten sich Zonierungen mit Schörl-Zusammensetzung, der Na-Gehalt nimmt zum Rand hin zu. Die Anwachssäume und feinen Zonierungen metamorphen Ursprungs weisen auf Anreicherung von F im Fluid hin. In Probe 2 wurde ein kataklastisch zerlegter Turmalin quantitativ analysiert, welcher nur sehr wenige Anwachssäume aufweist. Die Messungen ergaben nur geringe Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der einzelnen kleinen Turmalinbruchstücke und lediglich einen leicht erhöhten Gehalt an Ca und Mn.

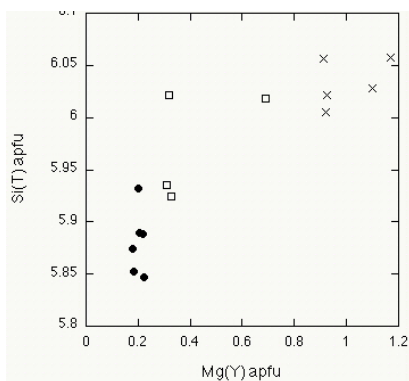
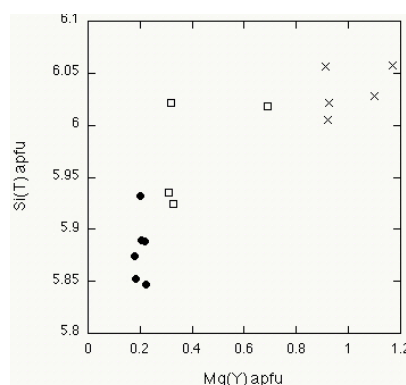


Abbildung 10A:

$Si(T)$ vs. $Mg(Y)$. Die Schwarzen Punkte stellen die magmatischen Turmaline (Tur mag), die offenen Rechtecke die älteren metamorphen Anwachssäume (Tur met-1) und die Kreuze die jüngeren metamorphen Rissfüllungen (Tur met-2) dar.

Abbildung 10B:

$F(W)$ vs. $Na(X)$. Die Schwarzen Punkte stellen die magmatischen Turmaline (Tur mag), die offenen Rechtecke die älteren metamorphen Anwachssäume (Tur met-1) und die Kreuze die jüngeren metamorphen Rissfüllungen (Tur met-2) dar.



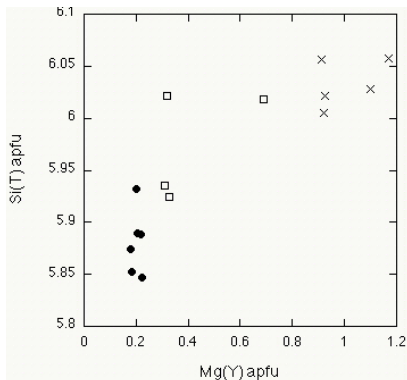


Abbildung 10C:
Ca(X) vs. Al(Y). Die Schwarzen Punkte stellen die magmatischen Turmaline (Tur mag), die offenen Rechtecke die älteren metamorphen Anwachsäume (Tur met-1) und die Kreuze die jüngeren metamorphen Rissfüllungen (Tur met-2) dar.

Magmatischer Turmalin: Die Analysen von magmatischen Turmalinzonierungen weisen einen auffallend geringen Gehalt an Si[T] auf (Abb. 10A). Die T-Position wird teilweise durch Al[T] besetzt, wodurch der Al-Gehalt unter 6 apfu sinkt. Al[T] variiert zwischen 0.7 und 1.5 apfu (Tab. 1). Auch die Y-Position ist überwiegend durch Al[Y] besetzt. Der Mg[Y]-Gehalt ist deshalb sehr niedrig (0.017-0.029 apfu, Abb. 10A). Die Besetzung der Y-Position durch Fe²⁺ zeigt hohe Werte im magmatischen Turmalin und nimmt zum Rand hin ab. Der F[W] Gehalt ist auch niedrig (Abb. 10B). Der Ca-Gehalt ist auch relativ gering (Abb. 10C). Der Na-Anteil auf der X-Position bei den magmatischen Turmalinen beträgt ca. 0.5 apfu (Abb. 10B) und steigt zum Rand hin leicht an. Auffallend ist bei den magmatischen Turmalinen, dass die Substitution $Al_{(tot)} + Li + \square \leftrightarrow Na[X] + (= Fe^{2+}, Mn^{2+}, Mg^{2+}) [Y]$ auftritt (Abb. 11).

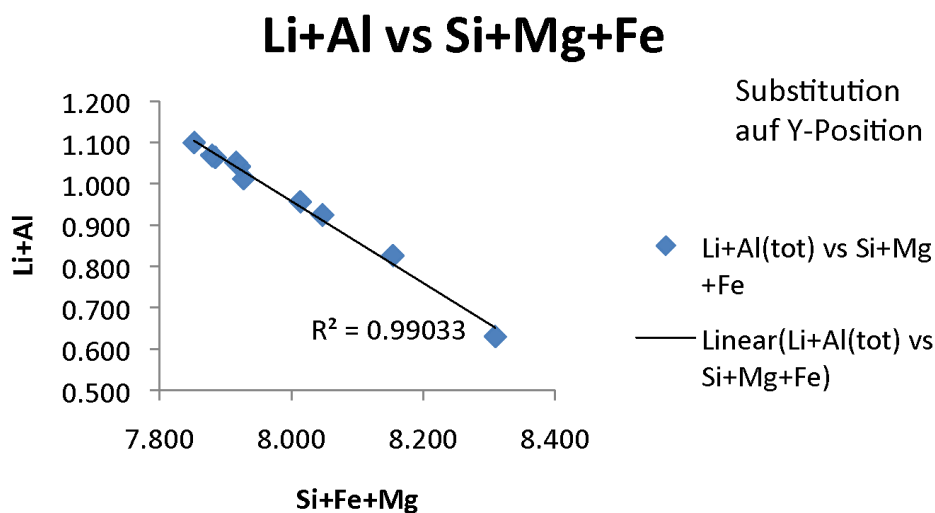


Abbildung 11:
Substitution $Li + Al_{(tot)}$ vs. $Si + Mg + Fe$ eines Profils durch einen magmatisch zonierten Turmalin (Kern, links, Rand, rechts) aus Probe 1B.

Metamorpher Turmalin: Die Analysen der metamorphen Turmaline, sowohl der randlichen Zonierungen (Tur met-1), als auch der Anwachssäume innerhalb von Rissen (Tur met-2) ergaben einen erhöhten Si[T]- Gehalt (Abb. 10A). Die T-Position wird vollständig durch Si besetzt und nicht mehr durch Al (Tab. 2). Das bedeutet, dass die Aktivität von Silizium zugenommen haben aus. Dementsprechend nimmt auch das Auftreten von Al auf der Y-Position ab (schwankt zwischen 0.6 und 0.3 apfu). Dagegen steigen die Anteile an Mg[Y] (um fast 1 apfu, Abb. 10A) und an F[W] (um 0.3 apfu) sehr stark an (Abb. 10B). Fe²⁺[Y] nimmt ebenfalls ab und Ca[X] tritt nur noch in vergleichbar geringen Mengen (ca. 0.3 apfu) auf (Abb. 10C). Na[X] steigt auf fast 0.8 apfu an (Abb. 10B). Die Tschermak-Substitution Mg[Y] + Si[T] ↔ Al[Y] + Al[T] (Abb. 12) und die Al(tot) + Li + □ ↔ Na[X] + (= Fe²⁺, Mn²⁺, Mg²⁺) [Y] Substitution treten auf.

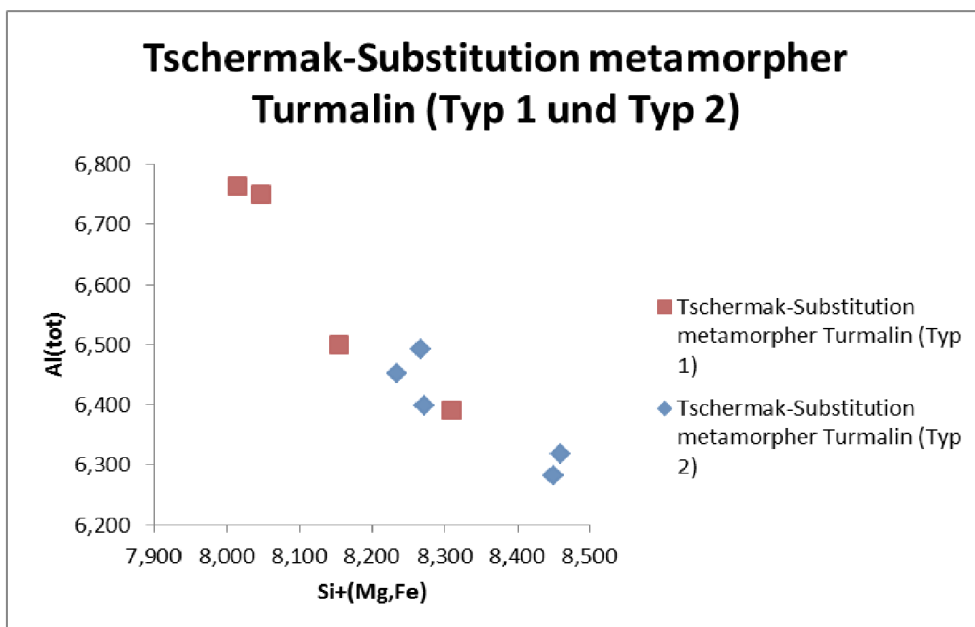


Abbildung 12:

Tschermaks-Substitution innerhalb der metamorph gewachsenen Turmaline aus Probe 1B.

Turmalinklassifikation nach HAWTHORNE & HENRY (1999)

Die Klassifikation von Turmalin basierend auf HAWTHORNE & HENRY (1999), wurde mithilfe des Programms WinCLASTOUR durchgeführt (YAVUZ et al., 2006). Dieses Programm klassifiziert die am häufigsten auftretenden Turmalin-Endglieder und andere hypothetische Endglieder. Das Programm dient dazu Daten, welche aus Mikrosondenanalysen gewonnen wurden, zu speichern und zu bearbeiten und dadurch Aussagen über die Verteilung der Kationen auf die strukturellen Positionen, sowie die Mol.% der Endglieder der Alkali-, Kalzium- und Leerstellen (□)-Turmaline machen zu können.

Probe	1B_Tur- 24_mitte 4	1B_Tur- 23_mitte 3	1B_Tur- 22_mitte 2	1B_Tur- 21_mitte 1	1B_Tur- 20_mitte
SiO ₂	35.85	35.16	34.90	35.68	35.50
TiO ₂	0.06	0.15	0.23	0.22	0.21
Al ₂ O ₃	35.07	34.77	34.65	34.84	34.94
Cr ₂ O ₃	n.d.	0.01	n.d.	0.03	0.01
FeO	12.89	12.97	12.96	13.28	13.21
MgO	0.81	0.87	0.89	0.83	0.72
CaO	0.03	0.04	0.08	0.09	0.08
MnO	0.17	0.12	0.17	0.20	0.18
Na ₂ O	1.50	1.49	1.82	1.81	1.88
K ₂ O	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04
F	0.26	0.35	0.30	0.43	0.39
Cl	n.d.	0.01	0.01	n.d.	0.01
H ₂ O*	3.50	3.42	3.43	3.43	3.44
B ₂ O ₃ *	10.50	10.38	10.37	10.53	10.50
Li ₂ O*	0.32	0.27	0.33	0.35	0.38
Total	100.98	100.02	100.18	101.77	101.48
O=F	0.11	0.15	0.13	0.18	0.17
Total*	100.87	99.87	100.05	101.58	101.31
Formel berechnet auf 31 Anionen (O, OH, F)					
T: Si	5.932	5.888	5.847	5.890	5.874
Al	0.068	0.112	0.153	0.110	0.126
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Z: Al	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Y: Al	0.772	0.750	0.689	0.668	0.689
Ti	0.007	0.018	0.028	0.027	0.026
Cr	n.d.	0.002	n.d.	0.005	0.002
Mg	0.200	0.217	0.221	0.205	0.177
Mn	0.025	0.017	0.024	0.029	0.025
Fe ²⁺	1.784	1.816	1.816	1.833	1.828
Li*	0.212	0.180	0.222	0.235	0.254
∑Y	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
X: Ca	0.005	0.007	0.015	0.017	0.013
Na	0.481	0.484	0.591	0.579	0.603
K	0.003	0.006	0.009	0.007	0.008
□	0.511	0.503	0.385	0.397	0.375
∑X	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
OH	3.863	3.816	3.838	3.774	3.792
F	0.137	0.183	0.161	0.226	0.206
Cl	n.d.	0.001	0.001	n.d.	0.002
Name	Foittit	Foittit	Schörl	Schörl	Schörl

*: berechnet; n.d.: not detected. The analyses from left to right represent a profile from core to the rim of the magmatic tourmaline.

Tabelle 1:
Repräsentative Mikrosondenanalysen von magmatischem Turmalin.

Probe	1B_Tur- 5_vein	1B_Tur- 4_vein	1B_Tur- 3_vein	1B_Tur- 2_vein	1B_Tur- 1_vein	1B_Tur- rim	1B_Tur- 19_rim
SiO ₂	36.88	37.26	36.67	37.37	36.86	36.39	36.44
TiO ₂	0.03	0.03	0.15	0.15	0.13	0.60	0.18
Al ₂ O ₃	32.80	32.79	33.64	33.50	33.51	32.79	33.37
Cr ₂ O ₃	0.01	n.d.	n.d.	0.02	0.01	n.d.	n.d.
FeO	9.74	8.99	9.79	9.63	9.42	11.59	13.13
MgO	4.51	4.83	3.77	3.77	3.80	2.79	1.29
CaO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.09
MnO	0.04	0.05	0.02	n.d.	0.02	0.03	0.14
Na ₂ O	2.50	2.51	2.11	2.24	2.32	1.90	2.05
K ₂ O	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	0.01	0.03
F	0.75	1.12	0.89	0.86	0.92	0.48	0.45
Cl	n.d.	0.01	0.01	0.01	0.02	n.d.	0.04
H ₂ O*	3.31	3.16	3.24	3.29	3.23	3.40	3.41
B ₂ O ₃ *	10.63	10.69	10.61	10.73	10.64	10.51	10.52
Li ₂ O*	0.37	0.48	0.34	0.56	0.48	0.36	0.49
Total	101.59	101.93	101.26	102.13	101.38	100.88	101.62
O=F	0.32	0.47	0.38	0.36	0.39	0.20	0.19
Total*	101.28	101.45	100.89	101.77	100.99	100.68	101.43
Formel berechnet auf 31 Anionen (O, OH, F)							
T: Si	6.028	6.057	6.005	6.056	6.022	6.018	6.022
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Z: Al	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Y: Al	0.319	0.282	0.492	0.398	0.452	0.391	0.499
Ti	0.004	0.003	0.018	0.018	0.016	0.075	0.022
Cr	0.001	n.d.	n.d.	0.002	0.001	n.d.	n.d.
Mg	1.099	1.171	0.920	0.911	0.925	0.688	0.317
Mn	0.005	0.007	0.003	n.d.	0.003	0.005	0.020
Fe ²⁺	1.331	1.222	1.341	1.305	1.287	1.603	1.815
Li*	0.241	0.315	0.226	0.366	0.316	0.238	0.327
ΣY	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
X: Ca	0.005	0.003	0.004	0.001	0.004	0.006	0.016
Na	0.792	0.791	0.670	0.704	0.735	0.609	0.657
K	n.d.	0.001	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	0.006
□	0.203	0.205	0.326	0.295	0.261	0.382	0.321
ΣY	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
OH	3.612	3.424	3.536	3.556	3.522	3.749	3.754
F	0.388	0.576	0.461	0.442	0.473	0.251	0.235
Cl	0.000	0.001	0.003	0.002	0.006	0.000	0.011
Name	Schörl	F-Schörl	Schörl	Schörl	Schörl	Schörl	Schörl

*: berechnet; n.d.: not detected; rim: Tur met-1; vein: Tur met-2.

Tabelle 2:
Repräsentative Mikrosondenanalysen von metamorphem Turmalin.

Die Ergebnisse können danach in Dreiecksdiagrammen dargestellt werden. Für die Klassifikation nach HAWTHORNE & HENRY (1999) wird die generelle Formel für Turmalin beschrieben durch: $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$ verwendet. Die Klassifikation zielt auf eine graphische Darstellung nach Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung in einer ternären Mischkristallreihe ab. Die Turmalinklassifikation nach HAWTHORNE & HENRY (1999) erfolgt nach der Fünzig-Prozent-Regel in fünf wesentlichen Schritten. Im ersten Schritt wird die Besetzung der X-Position festgelegt. Daraus ergibt sich die Unterteilung in drei Hauptgruppen: Alkali-Turmalin, Kalzium-Turmalin und Leerstellen (\square)-Turmalin. Danach wird das dominierende Anion (OH^- , F^- , O^{2-}) auf der W-Position ermittelt. Wobei beachtet werden muss, dass F^- nur auf der W-Position, sowie O^{2-} erstrangig auf der W-Position auftritt, es sei denn ein trivalentes Kation (Al^{3+} , Fe^{3+}) besetzt die Y-Position. In diesem Fall wird die V-Position durch O^{2-} und die W-Position durch OH^- belegt. Ausnahmen, bei denen die V-Position nicht durch OH^- besetzt wird bilden Hydroxy-/F-Buergerit/ oder -Olenit. Durch die Belegung der Y-Position ergeben sich insgesamt 27 mögliche Endglieder für Alkali-, Kalzium-, Leerstellen (\square)-Turmaline. Eine weitere Unterteilung in hypothetische Endglieder kann aufgrund der Besetzung der Z-Position durch Cr^{3+} und Fe^{3+} (Bsp. Chromdravit) erfolgen.

Dennoch bietet diese Methode der Klassifikation einige Schwierigkeiten und wird deshalb nicht zuletzt stark kritisiert. Eines der Probleme stellt die Verteilung der Kationen und Anionen auf die exakten Positionen dar, welche nicht bestimmt werden kann. Aus der mineralchemischen Analyse mittels Mikrosonde ergibt sich außerdem das Problem, dass die Gehalte bestimmter Komponenten, wie Li^+ , Fe^{3+} und H_2O nicht gemessen werden können und deshalb für die vollständige chemische Analyse der Turmaline verschiedene Normalisierungen vorgenommen werden müssen. Die stöchiometrische Gehalte an B_2O_3 ($B = 3$ apfu, atoms per formula unit), H_2O ($OH + F = 4$ apfu) und Li_2O auf der Y-Stelle werden durch das Programm nachträglich errechnet und für die Bestimmung der Strukturformel, basierend auf 31 Anionen, muss die Belegung der Z-Position durch Al (6 apfu) und die B-Position durch Bor (3 apfu) festgelegt werden. Ebenfalls kann das Oxidationsstadium von Fe und Mn oftmals nicht genau bestimmt werden. Das Programm WinCLASTOUR arbeitet deshalb mit der Annahmen, dass der gesamten Fe-Gehalt als Fe^{2+} vorliegt. Diese Kalkulation ist nur dann richtig, wenn die Summe der Ladungen der Kationen >58 beträgt (HAWTHORNE & HENRY, 1999). Die Berechnung von Fe^{3+} setzt die Messung von OH^- bzw. einen festgelegten OH^- -Wert voraus. Die Mengen an OH^- auf den V- und W-Stellen können aber nur bei signifikantem Auftreten von F^- auf der W-Position anhand der Bond Valence Sum (BVS) kalkuliert werden. Aus diesem Grund können bei der Klassifikation von Turmalinen nach der Besetzung der W-Stelle Probleme auftreten, wenn die restliche Verteilung der Kationen und Anionen in der Kristallstruktur unbekannt ist.

Innerhalb der Turmaline treten entlang von Rissen sehr stark ausgeprägt metamorphe Anwachssäume auf. Die gesamten Messungen zeigen dass aber nur sehr subtile Änderungen in der chemischen Zusammensetzung zwischen den metamorphen und magmatischen Turmalinen gibt. Sowohl an Rissen auftretende Anwachssäume, als auch an stark metamorph zonierte Rändern der Turmaline sind keine großen chemischen Änderungen zu beobachten, die zu einer unterschiedlichen Klassifikation der Turmaline basierend auf den Primärgruppen führen (Abb. 13A-C). Innerhalb der Gruppe der Ca-Turmaline treten aber leichte Unterschiede im Fe, Mg und Al Gehalt auf [Y] auf (Abb. 13A-C).

Geringe Unterschiede im F-Gehalt führen zu einer Variation zwischen Schörl und F-Schörl sowie dem Leerstellen (□)-Turmalin „Foitit“ bei dem die X-Position im Kristallgitter unbesetzt ist. Eine Querschnittsmessung eines großen Turmalinkristalles ergab für den zentralen Bereich des magmatischen, idiomorphen Turmalins die Zuordnung der Zusammensetzung zu dem Leerstellenturmalin Foitit (Abb. 13A), die äußeren, magmatischen als auch die metamorphen Turmalinzusammensetzungen spiegelten aber die typische Zusammensetzung des Schörls wider (Abb. 13B, C).

Abb. 13A:
Turmalinklassifikation der magmatischen Turmaline. Links die primären Turmalin-Gruppen und rechts die Klassifikation der Ca-Turmaline (HAWTHORNE & DIRLAM, 2011).

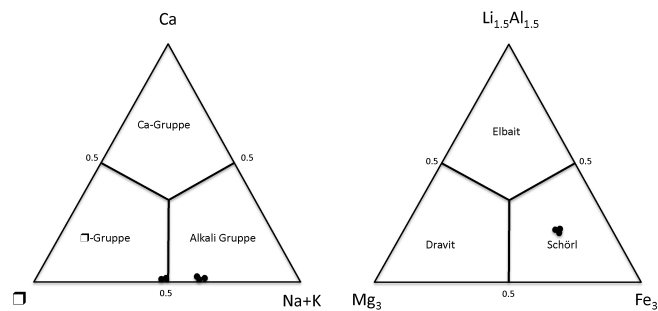


Abb. 13B:
Turmalinklassifikation der metamorphen Turmaline-1 (randliche, schmale Anwachsäume). Links die primären Turmalin-Gruppen und rechts die Klassifikation der Ca-Turmaline (HAWTHORNE & DIRLAM, 2011).

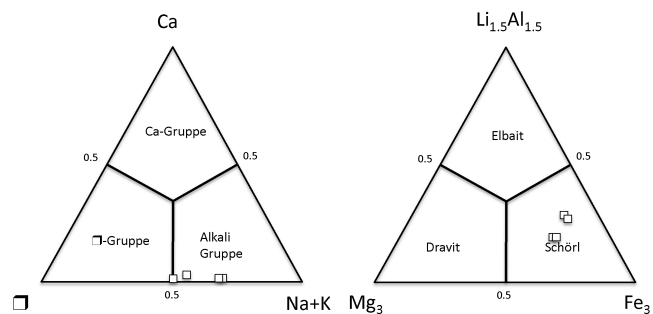
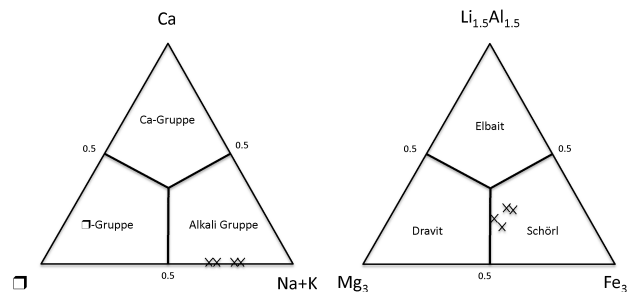


Abb. 13C:
Turmalinklassifikation der metamorphen Turmaline-2 (Rissfüllungen). Links die primären Turmalin-Gruppen und rechts die Klassifikation der Ca-Turmaline (HAWTHORNE & DIRLAM, 2011).



Diskussion

Turmalinzusammensetzung in Pegmatiten

DUTROW & HENRY (1996) beschreiben, dass sich die Zusammensetzung von metamorphen Turmalinen im Gegensatz zu magmatischen Turmalinen nur gering unterscheidet. Allgemein besitzen Turmaline aus Li-reichen Pegmatiten sehr geringe $Mg/(Mg+Fet_{total})$ Verhältnisse, also hauptsächlich Zusammensetzungen der Elbait-Schörl-Mischkristallreihe. Die, in unserem Fall, Li-armen Granite und Pegmatite zeichnen sich durch magmatische Turmaline der Schörl-Gruppe mit geringen bis mittleren $Mg/(Mg+Fet_{total})$ Verhältnissen zwischen 0.1 und 0.49 aus. Fe-reiche metamorphe Turmaline aus der Schörl-Gruppe der untersuchten Proben neigen bei metamorpher Überprägung schon bei niedrigen Temperaturen zum Zusammenbruch (DUTROW & HENRY, 1996). Metamorpher Turmalin unterscheidet sich von magmatischen Turmalin nicht nur in den Fe-Gehalten, sondern auch in ihrem Li und Mg-Gehalt (DUTROW & HENRY, 1996). Während Turmalin mit hohen Gehalten an $Li > 0.2$ apfu ausschließlich in Li-reichen Pegmatiten vorkommen, besitzen metamorphe Turmaline einen höheren Gehalt an $Mg > 0.2$ apfu und nur sehr geringe Li-Gehalte was bei den gemessenen Proben nur beobachtet werden konnte, da Li nur theoretisch berechnet werden konnte.

Die allgemeine Klassifikation aller Proben, sowohl der magmatischen, als auch der metamorphen Turmaline nach HAWTHORNE & HENTY (1999) ergab nur wenig Variationen zwischen der Leerstellengruppe und der Alkaligruppe. Alle Proben plotten indes in der Alkaligruppe ziemlich genau in das Feld mit der Schörl-Zusammensetzung (Abb. 13A-C). Die Unterscheidung zwischen Mg-Foitit oder Foitit ist im Dreiecksdiagramm im Gegensatz dazu nicht eindeutig da die Proben ziemlich ähnliche Anteile an Mg und Fe aufweisen. Der auftretende Fe-Tschermak-Vektor in den metamorph gewachsenen Turmalinen (Abb. 12) ist charakteristisch für P-T Bedingungen im Bereich des Überganges von der Grünschieferfazies zur Amphibolitfazies. Bei der Analyse von metamorphen Riss-Turmalinen (Tur met-2) ergaben einige Messungen eine F-Schörl-Zusammensetzung. Vergleicht man die Turmalinproben nach der Art der Genese fällt auf, dass der Si-Gehalt als Funktion der T steigt, während der Al[Y]-Gehalt von den magmatischen Proben über die metamorphen Anwachssäume (Tur met-1) und die Rissturmaline (Tur met-2) sinkt. Der Al[T]-Gehalt, sowie Ca[X] (Abb. 10C) und Ti[Y] sinken ebenfalls und sprechen deshalb eher für einen sinkenden Metamorphosegrad speziell von Tur met-1 zu Tur met-2. Die Besetzung der Y-Position durch Fe^{2+} im magmatischen Turmalin nimmt im Vergleich zu den neukristallisiertem Turmalinen innerhalb von Rissen ebenfalls stark ab ($Fe^{2+}[Y]$ (magmatisch) = ca. 1.8 apfu; (Adern) = ca. 1.3 apfu). Der Gehalt an Mg[Y] und Si[T] steigt im Gegensatz dazu mit der metamorphen Entwicklung. Dies spricht ebenfalls für einen abnehmenden Grad der Metamorphosebedingungen. Verdeutlicht wird dies auch durch die negative Steigung des Tschermak-Vektors (Abb. 12).

Vom magmatischen zum metamorphen Turmalin nimmt der Gehalt an Na[X] klar zu und der Anteil an Leerstellen (\square) ab. Die Zusammensetzung verändert sich beim Übergang der permischen magmatischen Zonierungen zu den coalpinen metamorphen Turmalinen daher von Foitit zu Schörl. Der Vergleich der OH^- -Gehalte mit $F^- + Cl^-$ ergibt einen perfekten linearen Zusammenhang. Die Substitution $OH^- \leftrightarrow (F^- + Cl^-)$ ist verantwortlich für die Variation zwischen Schörl und F-Schörl innerhalb der metamorphen Turmaline.

Durch Vergleich der Turmalinzusammensetzung kann ein Zusammenhang zum Evolutionsgrad des Wirtspgmatits hergestellt werden. Der Grad der Fraktionierung kann anhand der Leerstellen auf der X-Position, sowie anhand der Fe-, Mg-, Zn-, Li- und F-Gehalte hergeleitet werden (SOARE et al., 2008). Steigende Substitution von Fe + Mg durch Al + Li auf [Y] und von Ca oder Na + K durch eine Leerstelle (\square) ist typisch für die geochemische Entwicklung von granitischen Pegmatiten (Abb. 11). Der Anstieg von Leerstellen im Turmalinkristall mit zunehmender geochemischer Fraktionierung wird meistens durch die Besetzung von Al[Y] kompensiert. Nach SOARES et al. (2008) sind Turmaline mit hohen Al+Li-Gehalten und einem Mangel an Na (+K) charakteristisch für stark fraktionierte granitische Pegmatite. Auffallend ist daher die nahezu perfekte Korrelation bei den magmatischen Turmalinen von $(\text{Li} + \text{Al}_{\text{tot}}) \leftrightarrow (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Si})$ wie in Abbildung 11 dargestellt. Neben den isovalenten Substitutionen tritt auch eine Foitit Substitution $\text{Na}[X] + \text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn}[Y] \leftrightarrow \square[X] + \text{Al}[Y]$ auf, im Profil wird zum metamorphen Rand hin Al[Y] und die Leerstellen durch eine Zunahme von Na[X] und $\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ auf der Y-Position kompensiert. Dementsprechend steigt der Natriumanteil auf der X-Position von magmatischem Turmalin ca. 0.5 apfu zu metamorphem Turmalin ca. 0.8 apfu leicht an.

Interpretation und Korrelation Mineralwachstum/Metamorphose

Das permische magmatische Wachstum spiegelt sich in den breiten Zonierungen im Turmalin wider welche sich durch einen niedrigen Si-Gehalt und hohe Al-Gehalte auf den Positionen [T] und [Y] auszeichnen. Magmatisches Turmalinwachstum erfolgte unter Bedingungen mit hohem Angebot an Al und Mn, Fe und Ca und leicht erhöhtem Ti-Gehalten. Die Mineralchemie entspricht der Zusammensetzung von Foitit/Schörl. Während der eoalpidischen metamorphen Überprägung erfolgte eine Zunahme der Aktivität von SiO_2 da der Si[T]-Gehalt der spät-metamorphen Turmalinzonierungen entlang von Rissen (Tur met-2) ansteigt da die T-Position vollständig mit Si besetzt ist. Die metamorphen Zonierungen lassen sich vermutlich in zwei aufeinander folgende Stadien (metamorpher Turmalin-1: dünne Anwachsäume; metamorpher Turmalin-2: Rissfüllungen) untergliedern, in denen es sukzessive zur Abnahme von Al, Ti, Fe, Ca und zur Zunahme von Si, Mg, Na und F kam, was auf sinkende Metamorphosebedingungen schliessen lässt (VAN HINSBURG et al., 2011). Besonders Zonierungsmessungen entlang von Rissen weisen einen erhöhten F-Gehalt auf, was vermutlich auf eine Änderung der Zusammensetzung des zirkulierenden Fluids im späteren metamorphen Stadium zurückzuführen ist. Durch spätere Fluidzirkulation während der eoalpidischen Metamorphose wurde ebenfalls Ca und P remobilisiert, was zur Aggregatbildung von Apatit innerhalb von Rissen führte.

Literatur

- CLARK, C. (2007). Tourmaline: Structural formula calculations. - Canadian Mineralogist, 45, 229-237.
- DUTROW, B. & HENRY, D.J. (1996). Metamorphic tourmaline and its petrologic applications. - BORON: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 33, 503-557.
- HABLER, G., THÖNI, M. & GRASEMANN, B. (2009). Cretaceous metamorphism in the Austroalpine Matsch Unit (Eastern Alps): The interrelation between deformation and chemical equilibration processes. - Mineralogy and Petrology, 97, 149-171.

- HAMMER, W. (1912): Blatt 5345 Glurns und Ortler (mit Erläuterungen) 1:75000. - Geologische Spezialkarte der Österreichisch-Ungarischen Monarchie, K.K. Geologische Reichsanstalt, Wien.
- HAWTHORNE, F.C. & HENRY, D.J. (1999): Classification of the minerals of the tourmaline group. - *European Journal of Mineralogy*, 11, 201-215.
- HAWTHORNE, F.C. & DIRLAM, D.M. (1999): Tourmaline the indicator mineral: from atomic arrangement to Viking navigation. - *Elements*, 7, 307-312.
- HOPF, S. (2010): Turmalinpetrographie permischer Pegmatite aus der Matscher Decke (Vinschgau, Südtirol). - Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Innsbruck, 43 S.
- MATTHES, S. & OKRUSCH, M. (2009). *Mineralogie: Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. - Springer Verlag, Heidelberg, 8. Auflage, 658 S.
- SCHMID, S.M. & HAAS, R. (1989): Transition from near-surface thrusting to intrabasement decollement, Schlinig thrust, Eastern Alps. - *Tectonics*, 8, 697-718.
- VAN HINSBERG, V.J., HENRY, D.J. & DUTROW, B.L. (1999): Tourmaline as a petrologic forensic mineral: a unique recorder of its geologic past. - *Elements*, 7, 327-332.
- YAVUZ, F., YAVUZ, V. & SASMAZ, A. (2006): WinCLASTOUR: a computer program for classification of the minerals of the tourmaline group. - *Computers & Geosciences*, 32, 1156-1168.

received: 22.03.2012

accepted: 26.03.2012